

誘発筋電図記録時の随意筋収縮開始時点の同定法 － 負荷運動速度の違いについて －

Modulation of H-reflex facilitation prior to the onset of voluntary ankle dorsiflexion

笠井 達哉*・小宮山 伴与志**

Tatsuya Kasai* and Tomoyoshi Komiyama**

ABSTRACT

Previous studies on the modulation of the H-reflex prior to the onset of movement give various estimate for the interval between the beginning of the reflex facilitation and the onset of the EMG. Those discrepancy raised from experimental conditions, in which the unilaterally evoked H-reflex was referred in time to the onset of the movement of the ipsilateral homonymous muscle in a RT situation. The dorsiflexion under the two different response modes (step and ramp mode) was performed in the present experimental conditions, in which the unilaterally evoked H-reflex was referred in time to the movement onset of the contralateral homonymous muscle (TA), in a RT situation implying a bilateral dorsiflexion in response to an step tracking stimulation. This procedure was based on the proven equality of the RTs of the right and left responses, and on the constancy of the onset latency of the EMG in the same leg in the condition of unilateral and bilateral responding. This suggests that the motor command directed to the motoneurons (MNs) in the bilateral responding is not dissimilar to what is addressed to the same MNs in case of unilateral response. On the other hand, bilateral response should not alter the facilitation observed in case of unilateral movement, since the H-reflex facilitation has been shown to be closely linked with command required for the contraction of the responding muscle.

I. はじめに

ヒトの反応動作に伴う誘発筋電図（H反射）の出現動態を観察することは、その動作の出現に関わる神経生理学的機序を解析するうえできわめて

大切である（田中，1986，小宮山と田中，1988）。すなわち，H反射の反応動作に伴う変化を調べることは，非侵触的にその筋の収縮様式を決定する脊髄運動ニューロンの興奮性の違いを調べたことになると考えられているからである（Magladery

* 国士舘大学・体育学部・体育心理学研究室（Faculty of Physical Education, Laboratory of Motor Behavior, Kokushikan University）
（現 広島大学・総合科学部）

** 広島大学・総合科学部（Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University）

& McDougal, 1950)。また、反応動作は随意運動の一つの典型的な例として実験的に制御しやすいことから、これまでも随意運動機能解析のモデルとして多用されてきた(Kasai & Komiyama, 1986; Kasai & Seki, 1987; Kasai, 1988)。最近、随意運動の脊随調節機構の解析手段として先述のH反射と反応時間を組み合わせる方法が開発され、興味深い報告が出されるようになった(Kagami-hara & Tanaka, 1985; Kasai & Komiyama, 1988)。

しかし、H反射法と反応時間法を併用する上で特に注意しなければならないことは、筋電図上で筋放電の有無によって決定される動作開始時点の正確な同定の仕方の問題である。すなわち、筋放電の出現動態は反応動作の違いのみならず、出現したH反射によっても修飾を受けるからである。これは、H反射出現が反回抑制・興奮性後過分極等の抑制効果を主動筋運動ニューロンにもたらすために、正常な随意性筋放電出現時点が遅れることによる(Hultborn & Pierrot-Deseilligny, 1979)。反応動作開始時点の正確な決定が不安定であれば、随意動作開始前からみられる主動筋促進と拮抗筋抑制の出現動態が、特にその出現時期

について報告者によりまちまちなのはむしろ当然のことである(Pierrot-Deseilligny, Lacert & Cathala, 1971; Blair-Thomas & Luschei, 1975; Kots, 1977; Bonnet, Requin & Semjen, 1981; 笠井, 1983; Eichenberger & Ruegg, 1984; Schieppati, Nardone & Musazzi, 1986; Frank, 1986; Kasai & Komiyama, 1988)。そこで、本報告は足背屈反応動作をモデルに負荷運動速度を変化させた時、動作開始前からみられる主動筋促進が負荷運動速度の条件による違いのみならず、随意動作開始時点の同定の仕方の違いによってどのような修飾を受けるものかを調べ、この問題点の解決策を検討した。

II. 方 法

被検者は前脛骨筋からH反射が記録できた健康な成人男子9名であった。これら各被検者について、再現性を確認するために同じ条件下で2—4回の実験を行った。

図1に実験装置と記録のブロック線図および被検者の姿勢を示した。被検者を実験用の特設安楽椅子にすわらせ、両側の足を不動性の足ペダルに固定した。膝関節と足関節をそれぞれ膝屈曲60度

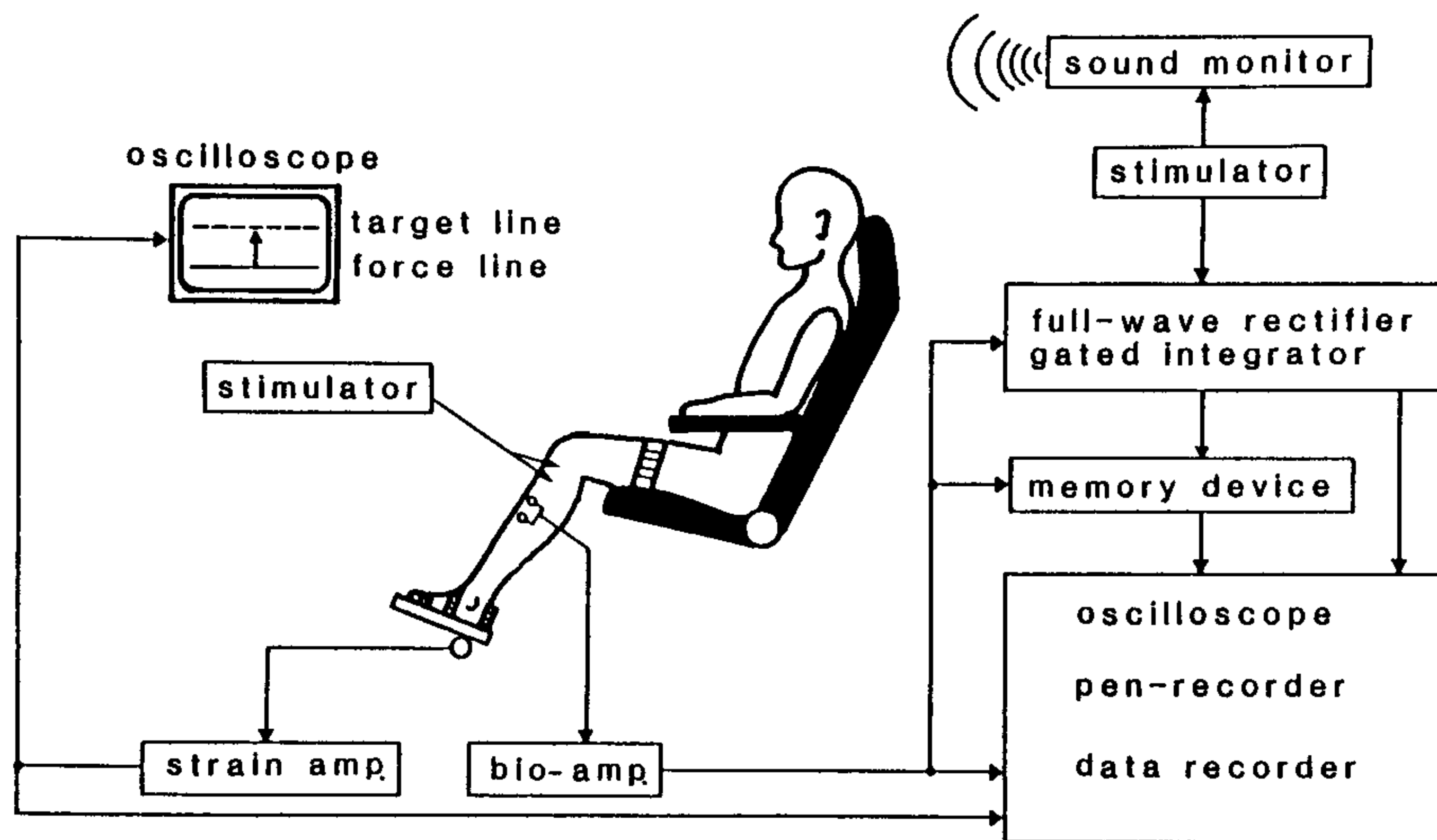


図1 実験装置と記録のブロック線図および被検者の姿勢。

と足底屈80度（完全伸展位を0度とする）に保持した。筋電図記録および神経刺激には表面電極を用いた。各一对の皿電極（直径10mm）を、両側の前脛骨筋の筋腹に縦方向に3cmの間隔で装着した。一側下肢の総腓骨神経に腓骨小頭の高さで、1ms持続の矩形波の電気刺激を与え前脛骨筋からH反射を誘発した。このようにして誘発されたH反射の振幅を主動筋運動ニューロンの興奮性の指標にした。

試験運動課題は両側同時の等尺性足背屈運動で、運動速度の変更はstep型およびramp型視標移動方式により行った。視標ビームは、ブザー音による予告信号の後ランダムな時間間隔（1.2—3.0秒）で上方へstep型あるいはramp型に移動する。視標移動開始後、一側の総腓骨神経に試験刺激を与え、前脛骨筋にH反射を誘発した。こ

の時、刺激側および非刺激側の前脛骨筋筋放電開始時点を随意足背屈運動開始時点（筋電図反応時間）としてそれぞれ計測し両者の異同を検討した。また、この基準点からH反射出現までの時間と、得られたH反射の振幅を計測して、随意的足背屈運動に伴う前脛骨筋運動ニューロンの興奮性変化の時間経過を調べた。

Ⅲ．結果と考察

図2に実際の筋電図記録（B）と、それにもとづいてH反射を導出した側を基点にして得られた、前脛骨筋運動ニューロンの時間経過の散布図（A）を示した。図2Aの散布図において、H反射は随意筋電図出現前50ms付近で出現した。通常、正常人の前脛骨筋では安静時にH反射は誘発しにくいことから、このH反射出現は前脛骨筋運動ニュー

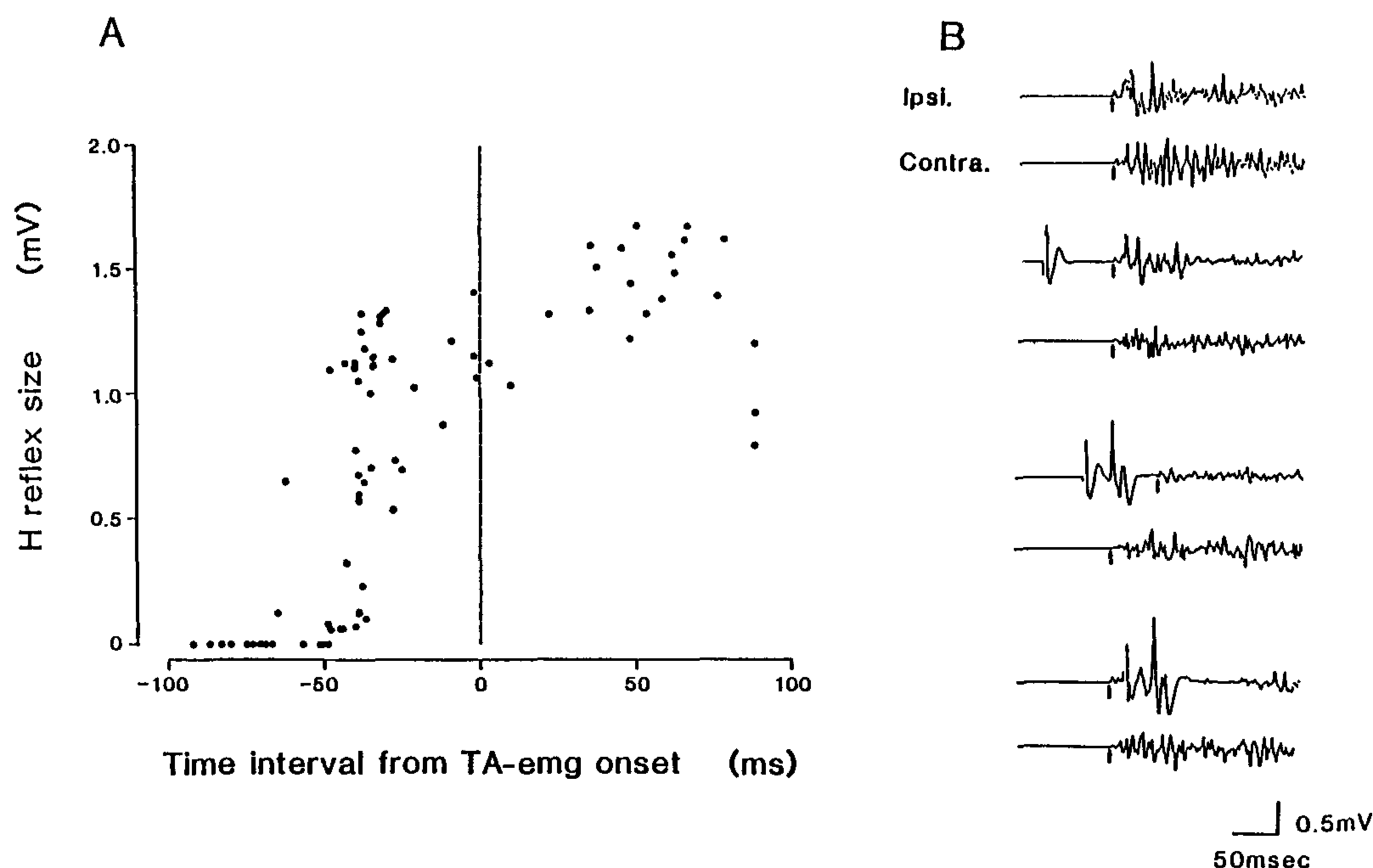


図2 A：刺激足のEMG開始時点を基準に（横軸），その前後のH反射の振幅をプロットした散布図。B：刺激足（Ipsi.：上段のトレース）と非刺激足（Contra.：下段のトレース）の足背屈運動に伴う前脛骨筋の筋電図記録例。上から刺激を与えない場合，刺激がEMG出現から遠く離れた時点で与えられた場合，刺激をEMG出現直前に与えた場合，刺激をEMG出現後に与えた場合の記録である。矢印はそれぞれEMGの開始時点を示している。刺激がEMGの開始時点の近くで与えられると，刺激を与えられた足の随意EMG出現が影響を受けることを示す（3番目のトレース）。

ロンの促通を示していることになる。しかし、随意筋電図開始までの期間において、その促通動態は大小様々で、その発達曲線も歪曲していた。このようなことが起こった理由を、図2 B の実際の筋電図記録例で示した。すなわち、両足の筋電図開始時点は、刺激を運動開始直前に与えた場合を除いて、いずれもほぼ同期している（1, 2 および 4 番目のトレース中の矢印参照）のに対して、刺激を運動開始直前に与えた場合は、刺激と同側（図中の Ipsi.）の筋電図開始が反対側（図中の Contra.）のそれに比べて明かに遅れていた（3 番目のトレース中の矢印参照）。これは、前脛骨筋の H 反射出現が、反回抑制（Renshaw 抑制）や興奮性後過分極（afterhyperpolarization）等の抑制効果を主動筋運動ニューロンにもたらすため、脳からの下行性インパルスによる正常な筋電図出現時点が遅れた事による（Hultborn & Pierrot-Deseilligny, 1979）。したがって、刺激が与えられた足と同側の筋電図開始時点を反応時間として採用すると、本来の筋電図反応時間からかなり外

れた点を測定する危険性が伴う。

そこで、step 型および ramp 型反応動作において、刺激を与えることによって反応時間がどのような影響を受けるものかを検討した結果が図の 3 と 4 である。これらの結果は、反応刺激提示により左右同時に足背屈反応動作を行った時の非刺激足である左足の前脛骨筋 EMG 開始時点基準に（中央の矢印で示した点線：マイナスは刺激が左前脛骨筋 EMG 出現より前に与えられたことを示し、プラスは後に与えられたことを示す。横軸はその時間差）、それと刺激足の EMG 開始時点との差（左右肢の EMG-RT の差；縦軸）をプロットしたものである。step 型（図 3）および ramp 型（図 4）両反応動作とも、刺激が反応開始に近づくに従って反応時間の左右差が大きくなった。Step 型反応動作の場合は、反応動作開始前 30ms 頃から反応時間の左右差が出現し始め、反応動作開始前後で最大となり、その差は 40 ms に達した。Ramp 型反応動作では、反応開始前 50 ms 頃からすでに左右差が出現し始め、反応動作開始前後で

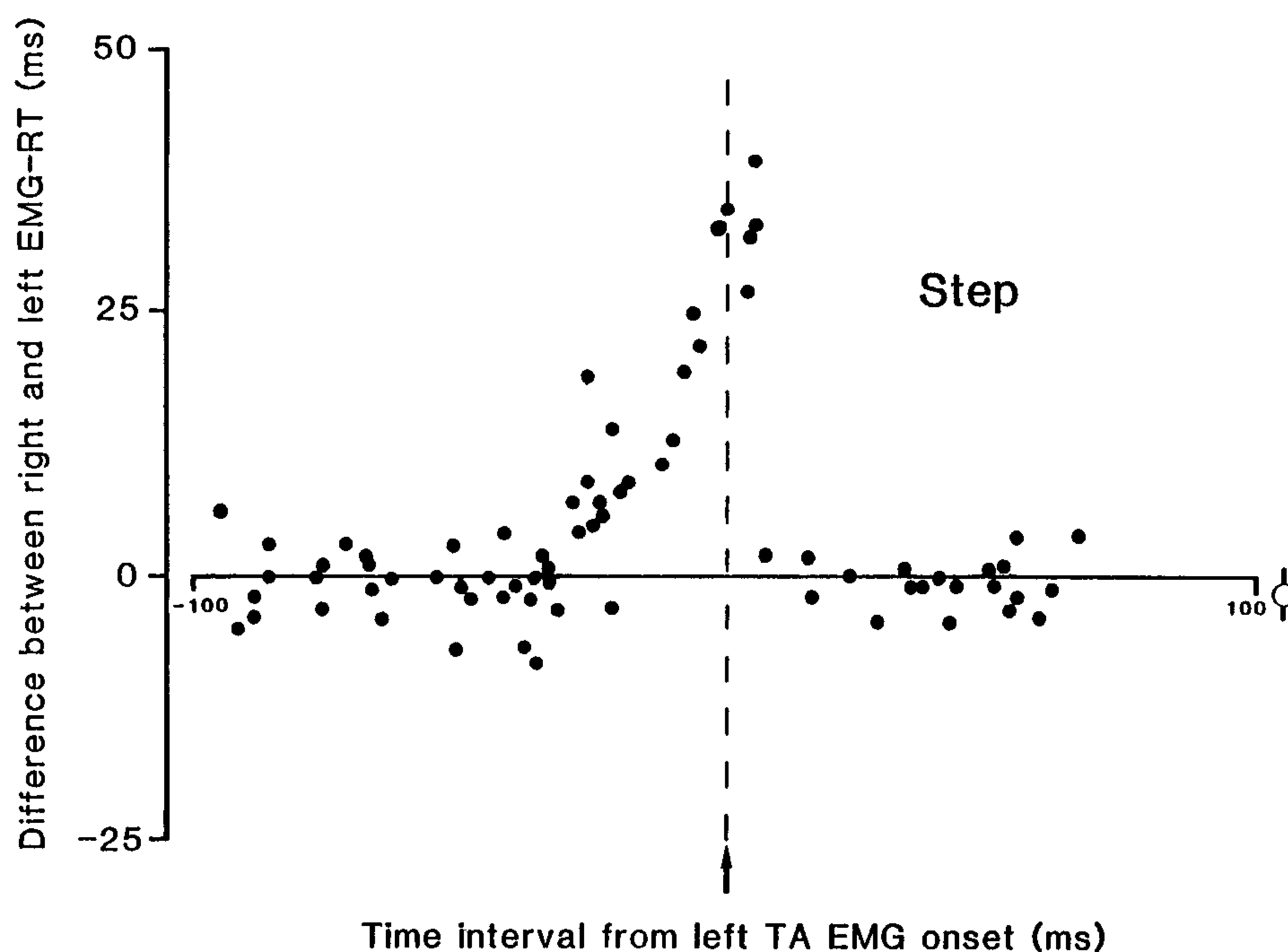


図3 Step型反応動作の刺激足と非刺激足の EMG-RT 差。非刺激足の前脛骨筋 EMG 出現時点をも 0（横軸：矢印）として、刺激がそれより前に与えられた時（図左側のマイナス側）と後に与えられた時（図右側のプラス側）の EMG-RT の左右差を縦軸にプロットして示した。説明本文。

は左右差が50ms を越えるものも出現した。この結果は、反応動作開始直前に刺激が与えられれば刺激を与えられた足の反応開始時点（EMG の出現）は大きく影響を受ける（遅れる）ことを示している。しかも、ramp 型反応動作において step 型反応動作に比べてその影響がより大きいことを示していた。これは、step 型と ramp 型の反応動作開始の初期において、運動の発現に参画する運動ニューロンに両者で違いがあることを意味している。すなわち、ramp 型の動作においては、小型で閾値の低い運動ニューロンがまず発火を開始し、順次大型のそれに移行していくのに対して、step 型の運動においては、小型および大型の運動ニューロンの区別なく短時間に順次発火すると考えられている(Desmedt, 1981)。このことが、反回抑制および興奮性後過分極の起こり方が ramp 型と step 型の動作の違いに相応して異なって起

こったものと考えられる。これが本実験結果で見られたように、step 型と ramp 型の動作で EMG の発現時点の差を引き起こし、結果として両者の EMG-RT の左右差の現れ方に違いを生じさせたものと考えられる。この事実から、もし随意運動の反応時間に左右差がないとすれば（図3、4の横軸の EMG 出現後のプロット参照）、本実験における筋電図反応時間の測定には両側同時動作をおこなわせ、刺激と反対側の筋電図記録から運動開始時点を決める方がより正確であると言える。

それでは、実際の反応時間の左右差はどれほどのものなのであろうか。そこで、刺激を与えないで実際の step 型および ramp 型の反応動作をおこなわせ、その時の左右肢の反応時間の関係をプロットして示したのが図5である。図6は、6名の被検者について step 型および ramp 型反応時間の左右差を調べた結果である。図5の結果より、

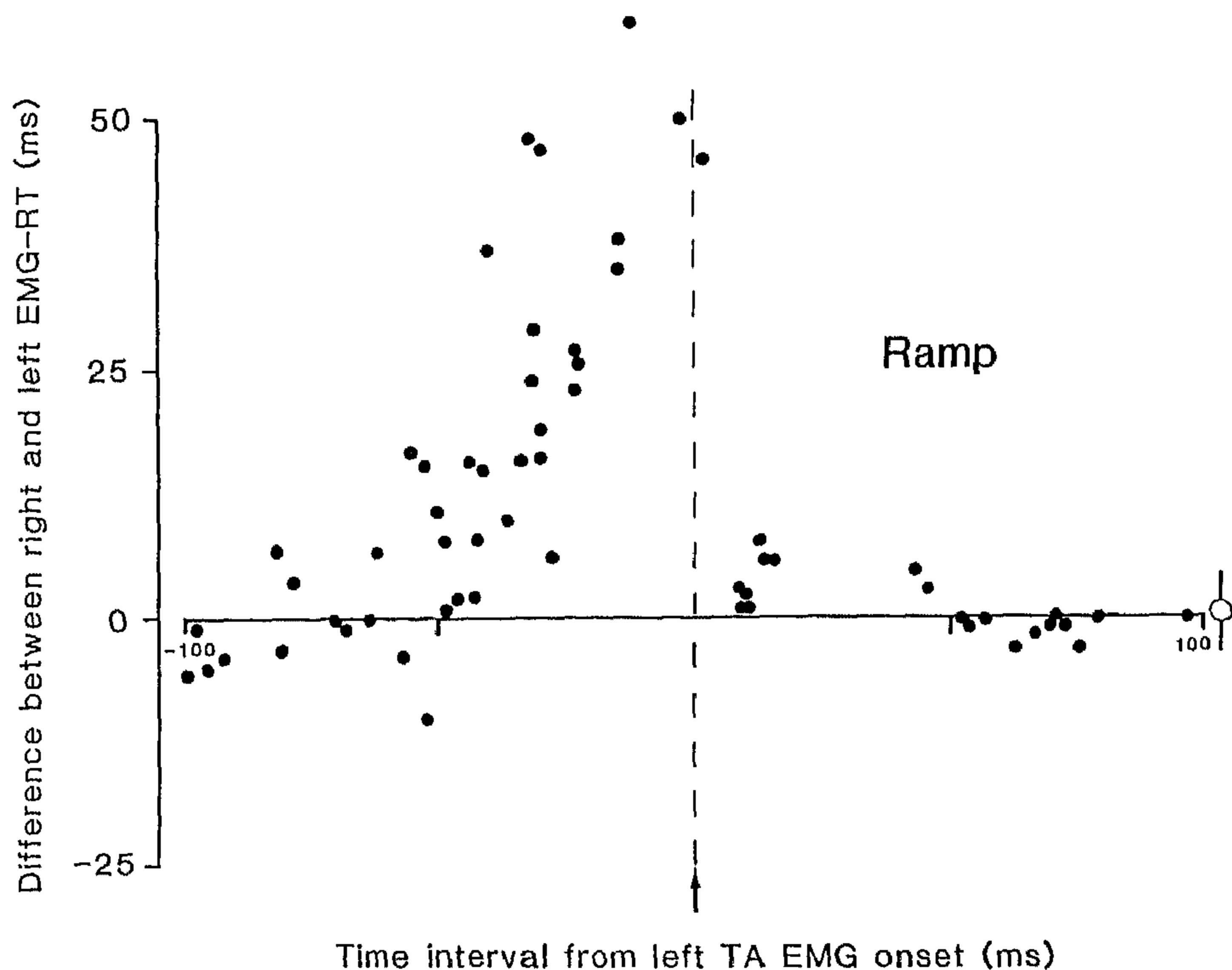


図4 Ramp型反応動作時の刺激足と非刺激足の EMG-RT の左右差。横軸、縦軸およびプロットの仕方は図3に同じ。説明本文。

step 型の反応時間は ramp 型のそれより短い (Beppu, Suda & Tanaka, 1984) が、両者とも左右の反応時間は高い相関関係をもって出現した。しかも、図 6 の結果から両者とも反応時間の左右差は 10ms 以内であり、反応動作の開始時点を決める上で無視しうる範囲内であった。そこで、先述のように反対足の前脛骨筋筋放電開始時点を用いて、運動開始前の促通現象をプロットし直した結果が図 7 である。この図より、H 反射の出現とその発達は図 2 A のそれに比べて、よりなめらかで連続的な変化を示した。

そこで改めて動作開始前の H 反射の発達曲線に注目してみると、筋電図出現時における H 反射の振幅の程度は step 型も ramp 型もほぼ同じであった。しかし、その促通の発達は ramp 型におい

て step 型のそれに比べて早期に開始された。すなわち、筋電図発現時での H 反射の振幅は両者ともほぼ同じレベルであったことから、促通の起こる時間経過は step 型運動の場合には急峻になり、ramp 型運動の場合に緩やかとなった。このことは、随意運動開始前の促通は運動速度の変化などの運動形態の違いにより変化を受けることを示している。言い換えれば、運動形態の違いに相応して運動のプログラムは異なっており、それはその運動開始前にみられる促通現象にも反映されることを示唆している。

IV. ま と め

随意運動開始前の主動筋運動ニューロンの促通現象について、足背屈運動をモデルに、随意運動

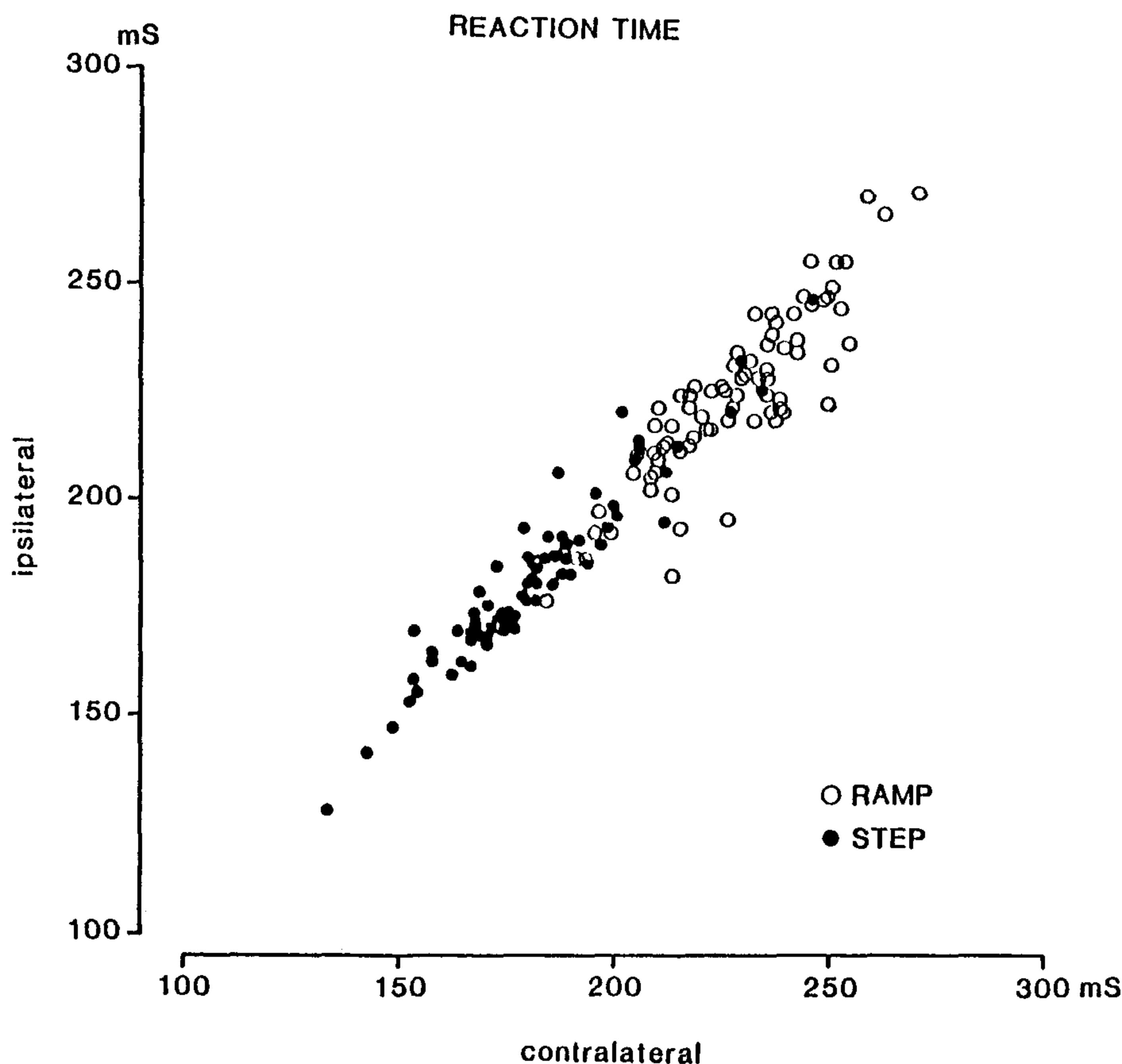


図 5 刺激を与えないで両足同時の足背屈反応動作を行わせた時の左右の EMG-RT の相関図。白丸は ramp 型、黒丸は step 型の動作を示す。説明本文。

開始時点の同定法と負荷運動速度の違いの影響について調べた。得られた結果は以下のごとくであった：

1. 随意運動開始時点（EMG 出現時点）は，H 反射導出の刺激によって大きく影響された。この解決のためには，両足同時動作を運動課題に用いることが有効であることがわかった。
2. 負荷運動速度の違いは，随意運動開始前の促通の起こり方に影響した。すなわち，運動速度が遅い時促通は早期に発現した。しかし，筋放電開始時点の H 反射の大きさには運動速度の違いによる差異は認められなかった。このことは，運動形態の違いに相応して，脳から送られる運動プログラムが質的に異なっていることを示しており，それが随意運動開始前にみられる促通現象にも反映されていることが示唆された。

参 考 文 献

- 1) Beppu, H., Suda, M. and Tanaka, R. ; Analysis of cerebellar motor disorder by visually guided elbow movement. Brain, 107 ; 787-809, 1984.
- 2) Blair-Thomas, C.A. and Luschei, E.S. ; Increases in reflex excitability of monkey masseter motoneurons before a jaw-bite reaction-time responses. Journal of Neurophysiology, 38 ; 981-989, 1975.
- 3) Bonnet, M., Requin, J. and Semjen, A. ; Human reflexology and motor preparation. In : D. Miller (Ed.), Exercise and Sport Science Reviews, Vol. 9, 1981, Franklin Institute Press, Philadelphia, PA, 119-157.
- 4) Desmedt, J.E. ; The size principle of motoneuron recruitment in ballistic or ramp volu-

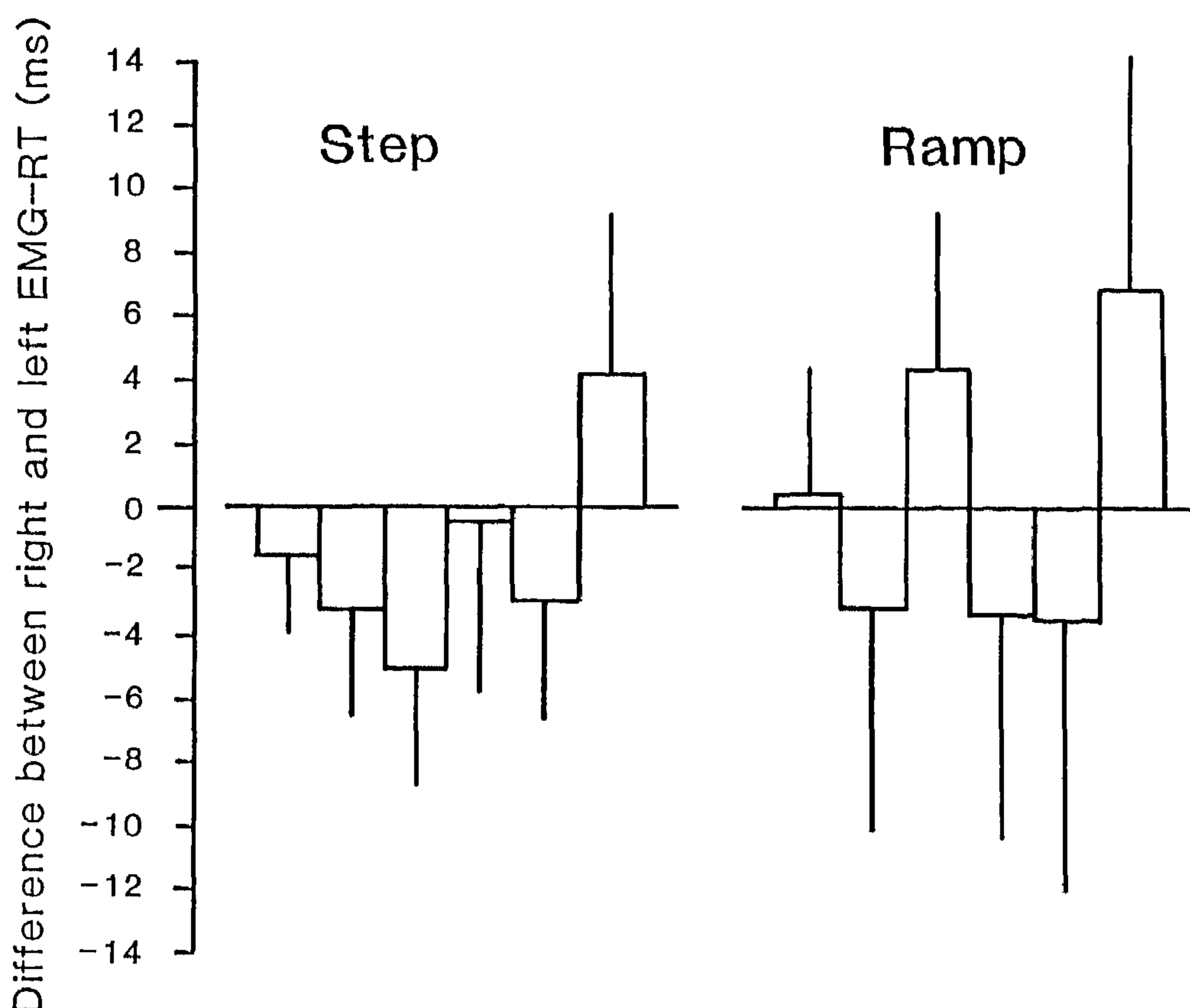


図6 図5の条件下で ramp 型および step 型の反応動作で得られた 6 名の EMG-RT の左右差。説明本文。

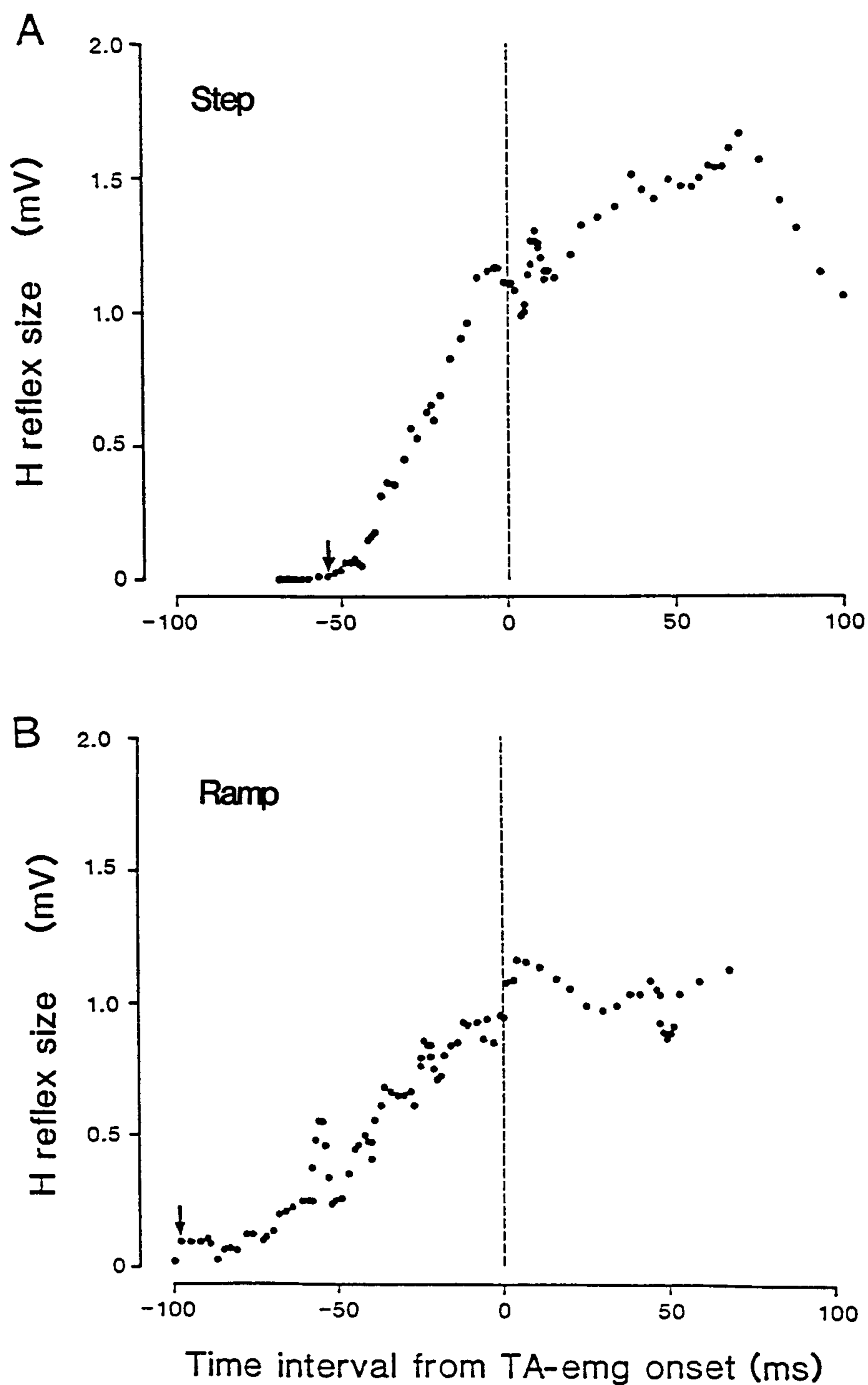


図7 step 型 (A) と ramp 型 (B) の反応動作における促通動態 (移動平均化したもの)。説明本文。

- untary contractions in man. In : J.E. Desmedt (Ed.), *Progress in Clinical Neurophysiology*, Vol. 9, 1981, Karger, Basel, 97–136.
- 5) Eichenberger, A. and Ruegg, D. ; Relation between the specific H reflex facilitation preceding a voluntary movement and movement parameters in man. *Journal of Physiology*, 347 ; 545–559, 1984.
- 6) Frank, J.S. ; Spinal motor preparation in humans. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 63 ; 361–370, 1986.
- 7) Hultborn, H. and Pierrot-Deseilligny, E. ; Changes in recurrent inhibition during voluntary soleus contraction in man studies by an H-reflex technique. *Journal of Physiology*, 279 ; 229–251, 1979.
- 8) 笠井達哉 ; 先行抑制の運動パターン presetting 依存性, *体力科学*, 32 ; 278–284, 1983.
- 9) Kasai, T. and Komiyama, T. ; EMG-reaction time of the biceps brachii in bilateral simultaneous motions. *Perceptual and Motor Skills*, 63 ; 455–460, 1986.
- 10) Kasai, T. and Seki, H. ; Motor reaction times of the simple and the choice ballistic elbow extension. *Journal of Human Movement Studies*, 13 ; 353–361, 1987.
- 11) Kasai, T. ; Is the reduction of reaction time an adequate estimate of the effect of practice ? *Perceptual and Motor Skills*, 66 ; 51–56, 1988.
- 12) Kasai, T. and Komiyama, T. ; The timing and the amount of agonist facilitation and antagonist inhibition of varying ankle dorsiflexion force in man. *Brain Research*, 447 ; 389–392, 1988.
- 13) Kagamihara, Y. and Tanaka, R. ; Reciprocal Ia inhibition upon initiation of voluntary movement. *Neuroscience Letter*, 55 ; 23–27, 1985.
- 14) 小宮山伴与志, 田中励作 ; H反射による随意運動調節機構の解析, *臨床脳波*, Vol. 30 ; 573–576, 1988.
- 15) Kots, Ya. M. ; *The organization of voluntary movement*. 1977, Plenum Press, New York and London, 276pp.
- 16) Magladery, J.W. and McDougal, D.B. Jr. ; Electrophysiological studies of nerve and reflex activity in normal man. *Bulletin of Johns Hopkins Hospital*, 86 ; 265–290, 1950.
- 17) Pierrot-Deseilligny, E., Lacert, P. and Cathala, H.P. ; Amplitude et variabilite de reflexes monosynaptiques avant un mouvement volontaire. *Physiology & Behavior*, 7 ; 93–132, 1971.
- 18) Schieppati, M., Nardone, A. and Musazzi, M. ; Modulation of the Hoffmann reflex by rapid muscle contraction or release. *Human Neurobiology*, 5 ; 59–66, 1986.
- 19) 田中励作 ; H反射—ヒトにおける神経生理学研究の一技法, *生理学雑誌*, 48 ; 719–734, 1986.